

ГИПОТЕЗА МЕХАНИЗМА НАКОПЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ИСКОПАЕМЫХ УГЛЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Г. П. Сидорова¹, А. А. Якимов¹, Н. В. Овчаренко², Т. О. Гущина³

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия;

² Разрезуправление «Уртуйское», Краснокаменск, Россия;

³ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация: Показана актуальность проведенных исследований с точки зрения обеспечения экологической безопасности в районах с преимущественно угольной энергогенерацией, в частности, при обращении с ископаемыми углями с повышенным содержанием естественных радионуклидов. Гипотеза о механизмах накопления радиоактивных элементов в бурых углях Забайкалья была выдвинута авторами исследований несколько лет назад. Она представляется через баланс металла в виде схемы: кристаллические породы фундамента → осадочные углевмещающие породы → уголь. Все последующие работы по исследованию буроугольных месторождений Забайкалья направлены на подтверждение данной гипотезы. В представленной статье даны сведения о геологическом строении и условиях залегания типичных месторождений углей с повышенным содержанием ЕРН – Кутинского и Пограничного. Приведены состав полевых работ на участках месторождений и данные каротажа по скважинам на Пограничном месторождении. Выделены зоны повышенной активности естественных радионуклидов на площадях месторождений. Представлены данные об интенсивности гамма-излучения угля, вмещающих пород и пород фундамента, в том числе по бороздовым пробам. Даны результаты измерения уровня радионуклидов в пробах пород и угля в лабораторных условиях. Отмечены повышенные содержания 40К во вмещающих и переслаивающих породах, что объясняется наличием смеси микроклина и ортоклаза в породах фундамента и глинистой составляющей во вскрышных и вмещающих породах и подтверждает выдвинутую гипотезу.

Ключевые слова: ископаемый уголь, Забайкалье, естественные радионуклиды, пробы, полевые и лабораторные исследования, гипотеза, прогноз, механизм накопления ЕРН.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, № 18–05–00397.

Для цитирования: Сидорова Г. П., Якимов А. А., Овчаренко Н. В., Гущина Т. О. Гипотеза механизма накопления естественных радионуклидов в ископаемых углях месторождений Юго-восточного Забайкалья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-2. – С. 143–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_143.

The hypothesis on accumulation mechanism of natural radionuclides in coal fields in Southeastern Transbaikalia

G. P. Sidorova¹, A. A. Yakimov¹, N. V. Ovcharenko², T. O. Gushhina³

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia;

² Coal mine «Urtuysky», Krasnokamensk, Russia;

³ National research technological University "MISIS", Moscow, Russia

Abstract: The relevance of the research is shown in terms of the ecological safety of regions with predominantly coal-fired power generation, in particular, when coal has high content of natural radionuclides. The hypothesis on the accumulation mechanism of radioactive elements in brown coals of Transbaikalia was put forward by the present study authors a few years ago. The hypothesis is presented as the crystalline basement rocks → sedimentary rocks → coal chain. All subsequent studies in brown coal fields of Transbaikalia were aimed to prove the hypotheses. This article informs on the geological structure and occurrence conditions of typical coal deposits with high content of natural radionuclides—Kutinsky and Pogranichny. The scope of field operations and logging data per wells in the Pogranichny deposit are presented. The zones of increased activity of natural radionuclides in the deposits are identified. The data on the intensity of gamma radiation from coal, sedimentary rocks and basement rocks, including trench samples, are presented. The laboratory test data on the level of radionuclides in rock and coal samples are given. The increased content of ⁴⁰K is observed in the host and interbedded rocks, which is explained by the presence of the microcline and orthoclase mixture in the basement rocks and by the clay component in the overburden rocks, and which confirms the hypothesis.

Key words: fossil coal, Transbaikal region, natural radionuclides, laboratory sample, field and laboratory research, hypothesis, forecast, mechanism of accumulation of natural radionuclides.

Acknowledgment: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, No. 18-05-00397.

For citation: Sidorova G. P., Yakimov A. A., Ovcharenko N. V., Gushhina T. O. The hypothesis on accumulation mechanism of natural radionuclides in coal fields in Southeastern Transbaikalia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3-2):143-152. [In Russ]. DOI:10.25018/0236_1493_2021_32_0_143.

Введение

Одним из направлений функционирования угледобывающих предприятий являются мероприятия, направленные на предотвращение загрязнения окружающей среды при добыче и переработке углей, что в свою очередь, мотивируется ужесточением требований к качеству и безопасности продукции угольной промышленности. Угольные ТЭС во многих регионах мира являются основными источниками загрязнения окружающей среды [1], большое количество аэрозолей, выделяемое при сжигании углей в атмосферу, приводит к необратимым нарушениям в организме человека и зачастую крайне опасным и непредсказуемым, вызванным неоднородностью состава углей [2]. Хотя следует отметить, что ископаемые угли являются перспективным источником критически важных для современной цивилизации химических элементов, извлечение которых возможно лишь из их золошлаков [3, 4]. Важнейшим вопросом в обеспечении

экологической безопасности является радиационное загрязнение, создаваемое угледобывающими предприятиями и угольными ТЭС.

Отсутствие или несовершенство технологий добычи, переработки и контроля качества углей, содержащих попутные элементы, приводит к тому, они поступают к конечному потребителю, и это приводит к дополнительной нагрузке на окружающую среду за счет выбросов токсичных аэрозолей и образования золошлаков с повышенным содержанием не только тяжелых и редких, но и радиоактивных элементов [5, 6]. Особенно актуальным это является для ископаемых углей Забайкалья, зачастую имеющих повышенные концентрации естественных радионуклидов (ЕРН).

Первоначальный прогноз и эколого-технологическая оценка участков месторождений с повышенным содержанием радиоактивных элементов возможны лишь на базе детального исследования генезиса, уровня накопления,

распределения и форм нахождения ЕРН в углях. Полученные данные позволят разрабатывать мероприятия по снижению негативного влияния ЕРН на окружающую среду уже на стадии проектирования [7].

Ранее детальные исследования по заявленной теме были выполнены на Уртуйском, Окинско-Ключевском, Харанорском и частично на Кутинском месторождениях.

В качестве объектов дальнейших исследований и для подтверждения выдвинутой гипотезы были выбраны Кутинское и Пограничное (для более детального изучения) месторождения Южно-Аргунского угленосного бассейна, расположенные в зоне повышенного содержания ЕРН (рис. 1) [8].

На месторождениях по составленным планам и в соответствии с разработанными и стандартными методиками аналитических исследований были проведены полевые работы, включающие опробование углей, пород, вмещающих угленосную пачку, перекрывающих пород и кристаллических пород фундамента, выходящих на поверхность в районе месторождений. На выделенных участках месторождений с повышенным содержанием ЕРН по гамма-каротажу пройдены профили со сгущением сети исследований и составлены предварительные карты опробования с выделением участков повышенной гамма-активности.

Анализ полученных данных позволил выделить глубину распространения гамма-активных пород на исследуемом участке и зону повышенной активности на площадях месторождений (рис. 2).

Пробы породы кристаллического фундамента, выходящие на поверхность в ближайшем окружении месторождения, перекрывающие породы, вмещающие угленосную пачку и угли,

отобранные при полевых работах, были исследованы в полевых условиях с использованием поискового дозиметра-радиометра ДКС-96 и в научно-аналитической лаборатории НОЦ ГФ ЗабГУ с использованием гамма-спектрометра «Прогресс-Гамма».

Породы кристаллического фундамента опробовались в местах выхода их на поверхность в 1,0...3,5 км от месторождений, при этом было выполнено 15 замеров активности и отобрано 10 штуфных проб. Результаты исследования проб представлены в табл. 1.

Повышенные концентрации ^{40}K в породах фундамента по данным оптического петрографического анализа связаны с наличием в породах полевых шпатов (до 40 % смеси микроклина и ортоклаза практически в равных долях, что является глинистой составляющей во вскрышных и вмещающих породах, частично в угле, имеющих также повышенные концентрации ^{40}K).

Осадочные породы и угольные пласты Пограничного месторождения исследовались по материалам бурения гидрогеологических скважин. Осадочные породы представлены покровными суглинками, нижнемеловыми алевролитами, аргиллитами и мелкозернистыми песчаниками. Уголь черный, малопрочный, представлен пластами и пропластками мощностью от первых сантиметров до 8,0 м.

Результаты изучения проб показали, что алевролиты и аргиллиты весьма однородны по составу и физическим свойствам, интенсивность гамма-излучения в среднем 20 мкР/ч (пропластки до 65 мкР/ч и 107 мкР/ч), участки повышенных значений интенсивности гамма-излучения предположительно имеют одинаковую природу повышенного содержания радионуклидов. Угольные пласты имеют очень

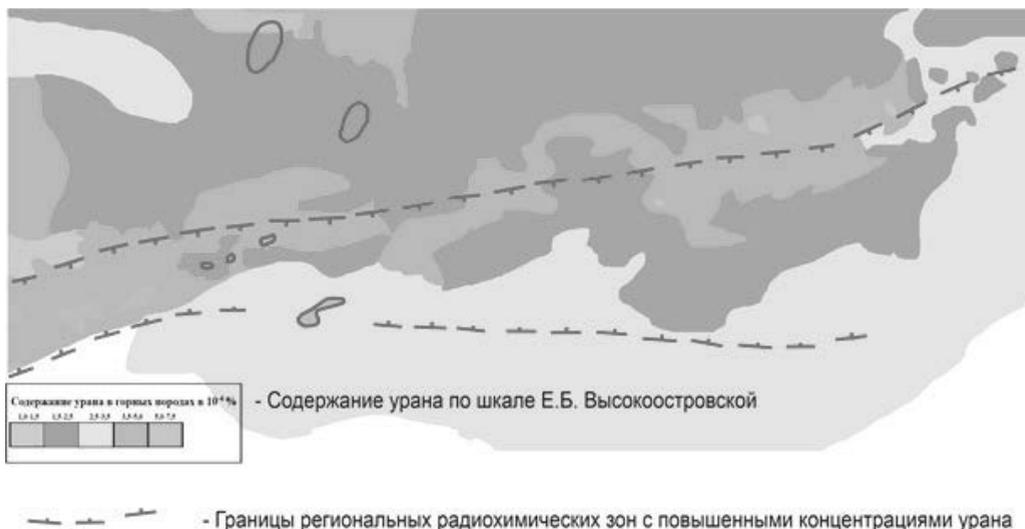


Рис. 1. Радиохимическая схема Южного Приаргунья
 Fig. 1. Radiochemical scheme of the Southern Priargunye

Таблица 1

Средние содержания естественных радионуклидов в породах фундамента
Average content of natural radionuclides in the basement rocks

Породы	Количество проб	U, (n · 10 ⁻⁴), %	²²⁶ Ra, Бк/кг	²³² Th, Бк/кг	⁴⁰ K, Бк/кг	Эффективная активность Аэфф, Бк/кг
Граниты	10	1,8–2,6	123,7	64,5	1231	317,64

низкую активность — от 0÷5 мкР/ч до 5÷8 мкР/ч. Данные гамма-каротажа по скважинам 1401 и 1402 представлены на рис. 3.

Пробы вмещающих, перекрывающих пород и угля Кутинского месторождения отбирались точечным и бороздовым способом по обнажениям в бортах разреза, всего было отобрано 60 проб. Угленосные отложения приурочены к верхней части кутинской свиты, свита сложена конгломератами, конгломерато-брекчиями, гравелитами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, содержащими пласты бурых углей и линзы сидеритов [10].

Измерение радионуклидов в пробах пород и угля проводилось в аналити-

ческой лаборатории НОЦ Забайкальского государственного университета с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» по методике, разработанной «Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений», основанной на регистрации спектров гамма-излучения, испускаемого веществом, входящим в состав пробы.

Результаты исследований проб на содержание урана и содержание ЕРН представлены в табл. 2.

Участки повышенной гамма-активности выделены по бороздовым пробам (рис 4.)

Таблица 2

Результаты лабораторных исследований проб по радиоактивности на Кутинском месторождении по бороздовым пробам
Results of laboratory studies of radioactivity samples at the Kutinsky field based on furrow samples

Количество проб	Материал	U, г/т	ЕРН, Бк/кг			A _{эфф} , Бк/кг
			²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
10	Перекрывающие породы	4,885	44,07	59,74	640	179,33
10	Переслаивающие породы	6,987	87,4	69,5	872,6	256,3
5	Углистый материал	6,418	52,06	34,96	194,4	115,0

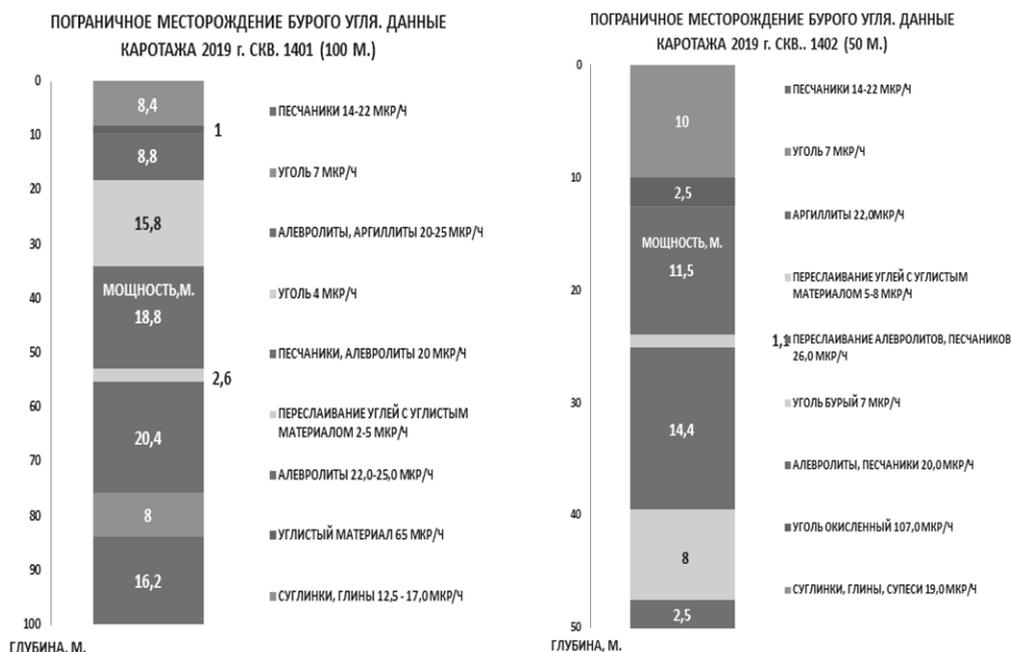


Рис. 3. Данные каротажа по скважинам на Пограничном месторождении угля
 Fig. 3. Logging data for wells on the Borderline coal deposit

Данные опробования показывают, что повышенные концентрации ⁴⁰K, отмечаются как в породах фундамента, так и в переслаивающих и вмещающих породах. Вероятно, что это связано с наличием в породах полевых шпатов от 10 до 45 %. [11] Это объясняется наличием смеси микроклина и ортоклаза в породах фундамента и глинистой составляющей во вскрышных и вмещающих породах и частично в угле,

также имеющем повышенные концентрации ⁴⁰K (рис. 3). Ранее считалось, что изотоп ⁴⁰K существенного влияния на суммарную удельную активность пород и углей не оказывает, и многими исследователями в расчет не принимался. Однако полученные нами предварительные результаты исследований подчеркивают значение влияния изо-

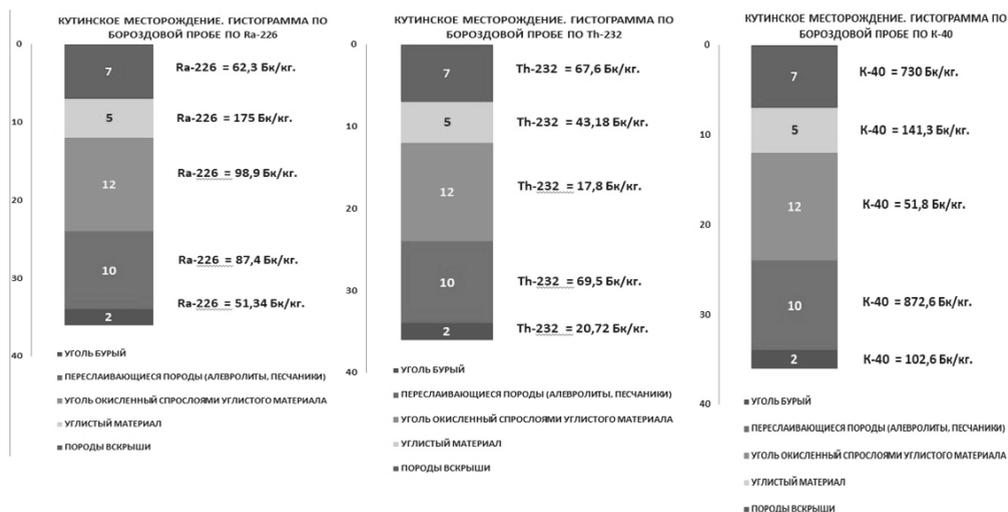


Рис. 4. Данные бороздowego опробования
 Fig. 4. Furrow sampling data



Рис. 5. Гистограмма зависимости содержания ^{40}K в породах Кутинского месторождения от содержания в них калиево-полевых шпатов (КПШ)
 Fig. 5. Histogram of the dependence of the ^{40}K content in the rocks of the Kutinsky deposit on the content of potassium-feldspar (KPS) in them

топа ^{40}K на удельную активность пород и предварительно подтверждают **гипотезу о механизмах накопления радиоактивных элементов в углях месторождений Забайкалья через баланс металла по схеме**: кристаллические породы фундамента – осадочные углевмещающие породы – уголь.

Подтверждение данной гипотезы позволит ориентировочно оценить баланс радиоактивных металлов в геологической среде, сформировавшей радиоактивную составляющую угольного месторождения.

Корректно оценить техногенное воздействие горных предприятий

на экологию в настоящее время возможно лишь на основе комплексного критерия, учитывающего весь спектр территориальной специфики и технологического уровня конкретного горного производства [12] и окончательное формирование комплекса мер по снижению экологических рисков разработки месторождений наряду с принятием инновационных технологических и организационных решений [13]. Нужно учитывать в первую очередь и базисные, геологические

особенности месторождений. Существующие в современном мире угрозы и вызовы перспективному развитию угольной отрасли России с учетом ее экспортного потенциала [14] предопределяют необходимость выявления уже на ранних стадиях освоения угольных месторождений геолого-технологических особенностей ископаемых углей, в частности, содержания ЕРН, и формирования комплексной оценки влияния их промышленного использования на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Larissa Schneider, Neil L. Rose, Anna Lintern, Darren Sinclair, Atun Zawadzki, Cameron Holley, Marco A. Aquino-López, Simon Haberle. Assessing environmental contamination from metal emission and relevant regulations in major areas of coal mining and electricity generation in Australia // *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 728, 137398.
2. A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, H. R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, M. H. Forouzanfar. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 // *Lancet*, 2017, Vol. 389 (10082), pp. 1907 – 1918.
3. S. Daia, R. B. Finkelman. Coal as a promising source of critical elements: progress and future prospects // *International Journal of Coal Geology*, 2018, Vol. 186, pp. 155 – 164.
4. Ferian Anggara, Hendra Amijaya, Agung Harijoko, Theodora Noely Tambaria, Amanda Ayudia Sahri, Zain Andrian Nur Asa. Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers // *International Journal of Coal Geology*, 2018, Vol. 196, pp. 159 – 172.
5. Adwek George, Boxiong Shen, Dongrui Kang, Yang Jiancheng, Luo Jiangze. Emission control strategies of hazardous trace elements from coal-fired power plants in China // *Journal of Environmental Sciences*, 2020, Vol. 93, pp. 66 – 90.
6. Xiaojiang Yu. Coal mining and environmental development in southwest China // *Environmental Development*, 2017, Vol. 21, pp. 77 – 86.
7. Сидорова Г. П., Авдеев П. Б., Якимов А. А., Овчаренко Н. В., Маниковский П. М. Мониторинг состояния окружающей среды на территориях, вовлеченных в обращение углей с повышенным содержанием естественных радионуклидов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 12. – С. 102 – 113.
8. Ищукова Л. П., Игошин Ю. А., Авдеев Б. В. Геология Урулунгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. – М., Геоинформ-марк, 1998. – 524 с.
9. Волостных Г. Т., Михайлова И. С. Зависимость состава и зональности аргиллизированных пород Стрельцовского уранового месторождения от степени рудоносности // *Поля гидротермально измененных пород и оценка их рудоносности: сб. науч. ст.* – Л., 1972. – С. 16 – 28.
10. Сидорова Г. П., Авдеев П. Б., Якимов А. А. Геолого-промышленная оценка и перспективы освоения Южно-Аргунского угленосного района // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 2. – С. 5 – 13.

11. Сидорова Г. П., Якимов А. А., Овчаренко Н. В., Гущина Т. О. Прогнозные исследования по решению проблемы снижения дозовой нагрузки на окружающую среду при отработке угольных месторождений имеющих угли с повышенным содержанием естественных радионуклидов // Вопросы теории и практики в строительстве и горном деле: матер. всеросс. науч.-практ. конф. (Чита 11 – 13 декабря 2018 г), редкол.: В. М. Герасимов [и др.]. – Чита: ЗабГУ, 2018. – С. 62 – 68.

12. Новоселов С. В. Проблема оценки техногенного воздействия на экологию странами – лидерами по производству и потреблению энергии // Уголь. – 2020. – № 2. – С. 48 – 50.

13. Михайлов В. Г., Коряков А. Г., Михайлов Г. С. Управление экологическими рисками в процессе добычи и переработки угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 5. – С. 83 – 91.

14. Плакиткина Л. С. Плакиткин Ю. А., Дьяченко К. И. Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития // Уголь. – 2016. – №7. – С. 12 – 16.

REFERENCE

1. Larissa Schneider, Neil L. Rose, Anna Lintern, Darren Sinclair, Atun Zawadzki, Cameron Holley, Marco A. Aquino-López, Simon Haberle. Assessing environmental contamination from metal emission and relevant regulations in major areas of coal mining and electricity generation in Australia. *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 728, 137398.

2. A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, H. R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, M. H. Forouzanfar. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet*, 2017, Vol. 389 (10082), pp. 1907 – 1918.

3. S. Daia, R. B. Finkelman. Coal as a promising source of critical elements: progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology*, 2018, Vol. 186, pp. 155 – 164.

4. Ferian Anggara, Hendra Amijaya, Agung Harijoko, Theodora Noely Tambaria, Amanda Ayudia Sahri, Zain Andrian Nur Asa. Rare earth element and yttrium content of coal in the Banko coalfield, South Sumatra Basin, Indonesia: Contributions from tonstein layers. *International Journal of Coal Geology*, 2018, Vol. 196, pp. 159 – 172.

5. Adwek George, Boxiong Shen, Dongrui Kang, Yang Jiancheng, Luo Jiangze. Emission control strategies of hazardous trace elements from coal-fired power plants in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, Vol. 93, pp. 66 – 90.

6. Xiaojiang Yu. Coal mining and environmental development in southwest China. *Environmental Development*, 2017, Vol. 21, pp. 77 – 86.

7. Sidorova G. P., Avdeev P. B., Yakimov A. A., Ovcharenko N. V., Manikovsky P. M. Environmental monitoring in the territories involved in mining and management of coal with high concentration of natural radionuclides. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 12. pp. 102 – 113.

8. Ishhukova L. P., Igoshin Ju.A., Avdeev B. V. *Geologija Uruljungevskogo rudnogo rajona i molibden-uranovyh mestorozhdenij Strel'covskogo rudnogo polja* [Geology of the Urulyunguevsky ore region and molybdenum-uranium deposits of the Streltsovsky ore field], Moscow, Geoinform-mark, 1998, 524 p. [In Russ].

9. Volostnyh G. T., Mihajlova I. S. *Zavisimost' sostava i zonal'nosti argillizirovannyh porod Strel'covskogo uranovogo mestorozhdenija ot stepeni rudonosnosti*. [Dependence of the composition and zoning of argillized rocks of the Streltsovsky uranium Deposit on the degree of ore content], Polja gidrotermal'no. izmenennyh porod i ocenka ih rudonosnosti: Sbornik nauch. stat. Leningrad, 1972. pp. 16 – 28. [In Russ].

10. Sidorova G. P., Avdeev P. B., Yakimov A. A. Geological-industrial evaluation and prospects of the southern argun's coal-bearing area exploitation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 2, pp. 5–13.

11. Sidorova G. P., Yakimov A. A., Ovcharenko N. V., Gushhina T. O. Prognoznyye issledovaniya po resheniyu problemy snizheniya dozovoj nagruzki na okruzhajushhuju sredu pri otrabotke ugol'nyh mestorozhdenij imejushhih ugli s povyshennym soderzhaniem estestvennyh radionuklidov [*Predictive studies to solve the problem of reducing the dose load on the environment during the development of coal deposits with coals with a high content of natural radionuclides*] *Voprosy teorii i praktiki v stroitel'stve i gornom dele: materialy vsrossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Chita: ZabGU, 2018. pp. 62–68. [In Russ].

12. Novoselov S. V. Problem assessment of technogenic impact by the leading countries in terms of energy production and consumption. *Ugol' – Russian Coal Journal*. 2020, no. 2, pp. 48–50.

13. Mikhailov V. G., Koryakov A. G., Mikhailov G. S. Ecological Risk Management in Coal Mining and Processing. *Journal of Mining Sciences*, 2015, no. 5, pp. 83–91.

14. Plakitkina L. S., Plakitkin Yu. A. & Dyachenko K. I. Russia's coal industry on the world coal market: trends of prospective development. *Ugol' – Russian Coal Journal*. 2016, no. 7. pp. 12–16. [In Russ]. 

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Сидорова Галина Петровна*¹ – докт. техн. наук, профессор, e-mail: druja@inbox.ru;
*Якимов Алексей Алексеевич*¹ – канд. техн. наук, доцент, e-mail: yaa76@yandex.ru;
*Овчаренко Наталья Валерьевна*² – канд. техн. наук, главный геолог, e-mail: nataovharenko@mail.ru;

*Гущина Татьяна Олеговна*³ – аспирант;

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия;

² Разрезуправление «Уртуйское», публичное акционерное общество «Приаргунское производственное горно-химическое объединение», урановый холдинг «АРМЗ», горнорудный дивизион Госкорпорации «Росатом», Краснокаменск, Забайкальский край, Россия;

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Sidorova G.P.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: druja@inbox.ru;

*Yakimov A.A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: yaa76@yandex.ru;

*Ovcharenko N.V.*², Cand. Sci. (Eng.), geologist, e-mail: nataovharenko@mail.ru;

*Gushhina T.O.*³, Graduate Student;

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia;

² Coal mine «Urtuysky», Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union, Krasnokamensk, Zabaykalsky Krai, Russia;

National research technological University “MISIS”, Moscow, Russia.

Получена редакцией 20.11.2020; получена после рецензии 23.12.2020; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 20.11.2020; received after the review 23.12.2020; accepted for printing 10.02.2021.

